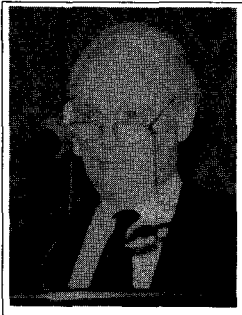


21세기 원자력산업의 전망과 과제

B. L. Eyre

영국 AEA Technology plc 부회장



유는 전력 수요는 급속한 산업화와 더불어 증가하고 있는 반면 환경에 큰 영향을 미치기 때문이다.

이 보고서에서 21세기의 전력 수요의 증가에 대응하기 위한 방안과 원자력의 역할을 논해 본다.

로 21세기 말까지 외삽법을 이용하여 연장되었다. 따라서 21세기 후반으로 갈수록 불확실성은 더욱 높다고 할 수 있다.

몇 가지 시나리오들 중 3가지 시나리오의 결과가 <그림 2>에 도시되어 있다.

시나리오 A는 높은 경제 성장을 고려한 경우로서, 1990년에서 2020년 사이에 세계 에너지 수요는 약 2배가 증가하는 것으로 되어 있다.

이러한 결과는 지난 30년의 평균 에너지 수요 증가율보다 약간 높은 것이다.

시나리오 B는 소위 참조 케이스로 불리우는데, 2020년까지 에너지 수요가 현재보다 50% 증가하는 경우이다. 경제 성장률은 적정률로 반영되었으며, 에너지 효율 향상도 가정되었다.

시나리오 C는 소위 생태학적인 요소가 반영된 경우로서, 경제 성장률은 시나리오 B의 경우와 유사하게 가정되었으나, 에너지 효율은 현재까지 이룩한 성과보다도 훨씬 향상된 것

전략적 배경

많은 보고서들이 미래의 에너지 수요와 에너지 자원 공급과의 관계를 시간의 함수로 분석하고 있다.

그 중에서도 세계에너지평의회(WEC)의 「미래 세계의 에너지에 관한 보고」는 권위있는 보고서로 평가되고 있다.

1. 에너지 수요

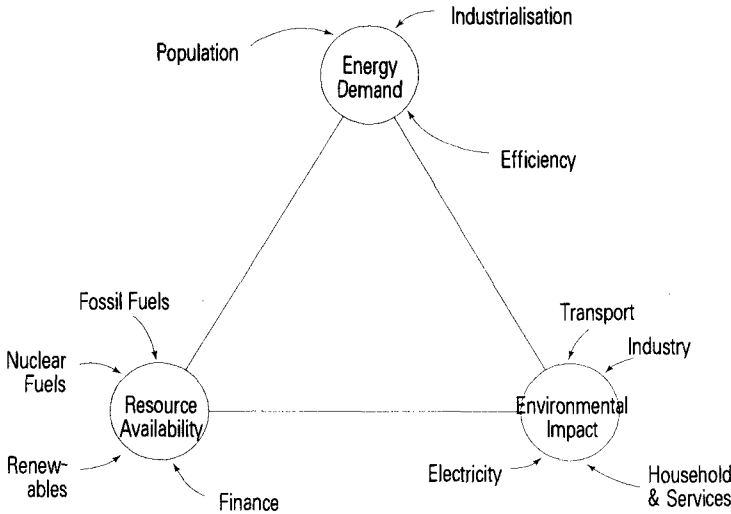
WEC의 보고서는 경제 성장, 에너지 효율 향상, 제3세계로의 기술 이전 등과 같은 요소들을 고려하여, 2020년까지의 에너지 수급에 관한 몇 가지 시나리오를 가정하고 그에 대한 지구적인 대응을 평가하였다.

이러한 분석들은 도식화를 목적으

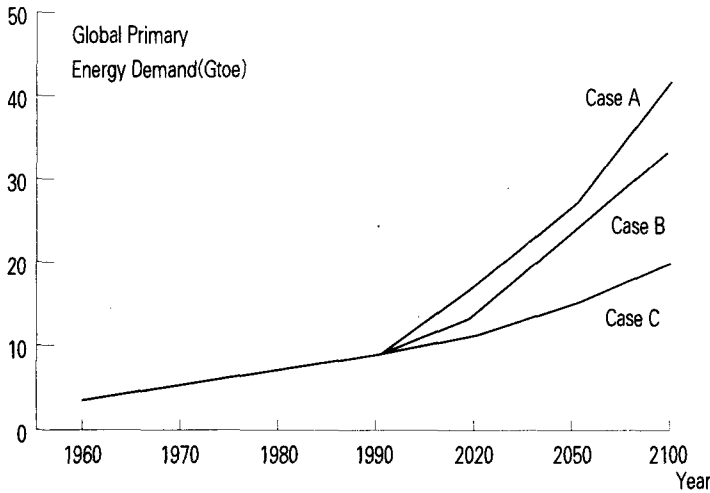
21 세기의 가장 중요한 과제 중의 하나는 세계 에너지 수요를 지속 가능한 방식으로 충족시키는 것이다. 여기서 지속 가능한 방식이란 지속적인 경제 성장, 생활 수준의 향상과 자원 및 환경적 제약의 균형을 유지하는 것을 의미한다.

<그림 1>에는 촉발 인자(에너지 수요를 촉발시키는 원인)와 제약 인자(에너지 공급을 제약하는 인자)가 도시되어 있다.

에너지의 수요와 공급에서 가장 핵심적인 인자는 전력 생산인데, 그 이



〈그림 1〉 에너지 수요 및 공급에 영향을 미치는 주요 인자



〈그림 2〉 세계 에너지 수요 예측

로 고려되었다.

이 경우에도 에너지 수요는 2020년까지 28%까지 증가하는 것으로 평가되었다.

이 글에서 인용된 대부분의 분석은

시나리오 B에 근거한 것이다.

〈그림 3〉은 1950년과 2100년 사이에 총 1차 에너지 수요의 분율로 표시된 전력 생산량과 전력 수요를 보다 상세하게 나타내주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 전력 수요의 증가는 대부분 개발 도상국이 차지하고 있으며, 전력 수요는 2020년 이후까지 30~40% 증가할 것으로 예상되고 있다.

만약 전기 자동차가 보편화될 수 있는 획기적인 계기가 마련된다면 전력 수요는 〈그림 3〉에 나타난 것보다 훨씬 높아질 것이다.

이러한 수요 증가를 유발하는 인자로는 인구·경제 성장 및 에너지 효율을 들 수 있다.

가. 인 구

세계 인구는 2020년까지 현재의 55억에서 80억으로 증가할 것이라는 것이 일반적인 관측이다.

그 이후에는 다소 불확실하지만, 2100년까지 현재의 2배로 증가하게 될 것으로 평가되고 있다.

나. 경제 성장

우리는 이미 일부 태평양 연안 국가와 같은 개발 도상국들이 놀랄만한 경제 성장을 이루고 있는 것을 목격해 왔으며, 이들 국가들은 새로이 팽창하는 경제권으로 진입하게 될 것이다. 이러한 상황은 중국이나 인도에서 이미 전개되고 있다.

다. 에너지 효율

산업 혁명 이후 에너지 효율은 지속적으로 증가해 왔다.

WEC의 시나리오 B의 추산에 따르면, 에너지 탄성치가 1.9%pa 감소하게 되면, 에너지 효율성이 개선되지 않았을 경우에 비해, 2020년경에

는 에너지 수요가 44% 감소하게 되는 것과 같은 효과를 것으로 평가된다.

2. 자 원

〈그림 1〉의 두 번째 축발 인자인 연료 자원은 맹백하게 에너지 공급의 주요 결정 인자이다. 그러나 미래의 에너지 소비와 자원의 매장량에 대해서는 상당한 불확실성이 내재되어 있다. 〈표 1〉에 나타난 바와 같이 화석 연료는 세계 1차 에너지 수요의 85%를 공급하고 있으며, 원자력 및 수력이 6~7%, 재생 에너지가 1% 이하를 공급하고 있다.

가. 화석 연료

화석 연료 매장량, 매장량 대 생산량의 비율(95년의 생산율에 근거)이 〈표 2〉에 나타나 있다. 이 표에서 특기할 만한 사항은 다음과 같다.

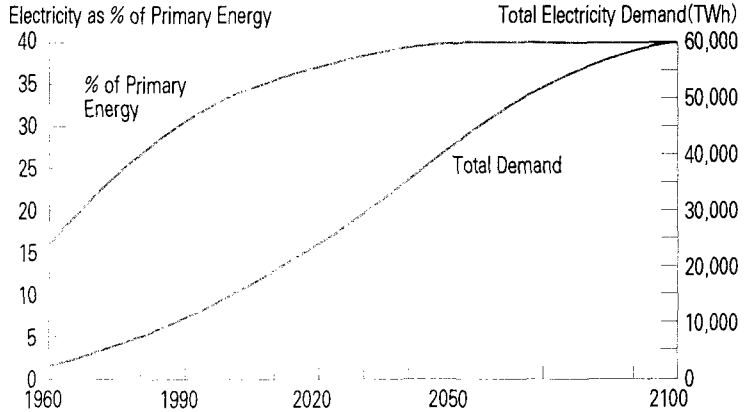
① 전체 추정 매장량과 미래의 생산량/소비량 패턴에는 불확실성이 내재되어 있다.

② 매장량/생산량 비율은 석유의 경우 89년부터, 가스의 경우 93년부터 약 5% 감소하였다.

③ 가스에 관한 핵심적인 문제는 전력 생산을 위한 가스 수요의 확산의 정도이며, 그로 인해 가스의 매장량과 가격에 미칠 수 있는 영향이다.

④ 보다 일반적으로 말해서 가까운 장래에 화석 연료의 매장량에 관해서는 큰 문제가 없다는 것이다.

나. 원자력



(그림 3) 2100년까지의 전력 수요 예측

우라늄 매장량과 우라늄 매장량/생산량에 관한 자료가 〈표 3〉에 나타나 있다.

현재의 가동중 원자로 기수를 기준으로 할 때, 확인된 우라늄 매장량/생산량의 비율은 약 60년 정도이며, 채광으로 인한 상업성이 있는 우라늄 광산을 모두 포함시킬 경우 약 85년

(표 1) 자원 : 에너지 공급

자 원	1차 에너지(%)	전기(%)
석 유	39	5~10
가 스	21	12
석 탄	26	40~45
수 력	6	19
원 자 력	6	17
신재생에너지	≤1	~2

(표 2) 자원 : 화석 연료

연 료	확인 매장량(Gtoe)	매장량/생산량(年)	추정 매장량(Gtoe)	매장량/생산량(年)
석 유	140	42	795	244
가 스	126	64	220	115
석 탄	507	228	3,400	≥1,000

(표 3) 자원 : 원자력 연료

구 분	천원 우라늄(백만톤)	등가 Gtoe	
		열중성자로	고속 증식로
확 인 매 장 량	3.7	37	1,850
추 정 매 장 량	1.4	14	700
확인매장량/생산량		~62	~3,000
추정매장량/생산량		~85	~4,250

정도이다. 만약 플루토늄이 열중성자로에서 재활용된다면, 매장량/생산량 비율은 개선될 것이다.

만약 플루토늄이 고속 증식로에서 재활용된다면, 매장량/생산량 비율은 약 50배 증가할 것이며, 따라서 상당한 기간 동안은 충분한 가용 자원을 확보하고 있다고 할 수 있다. 따라서 연료 자원 측면에서 원자력 발전은 21세기 이후까지도 지속 가능한 전력 생산 수단이 될 수 있을 것이다.

다. 재생 에너지

현재까지 개발된 재생 에너지, 즉 풍력 · 바이오매스 · 지열 · 태양열 · 조력 등은 세계 전력 수요의 2% 이하를 공급하고 있다.

특별한 개발 계획을 추진하지 않는 다하여도 그 점유율은 2020년까지는 4~5%로 증가할 것이며, 능동적인 개발이 전개된다면, 10%까지 상승할 수 있을 것으로 세계에너지평의회는 관측하고 있다.

3. 환경 영향

전력 생산으로 인한 환경 영향은 매우 다양하다. 화석 연료의 연소로부터 발생하는 입자 및 기체 방출물로부터 원전에서 발생하는 방사성 폐기물 등이 가장 대표적인 예이며, 새로운 재생 에너지로 인한 방대한 지역의 점유, 소음, 미관상의 문제 및 유해 물질 등이 있다.

화석 연료와 관련하여, 우리는 NOx(질소산화물)와 SOx(황산화물)

및 입자와 이산화탄소를 구분해서 고려할 필요가 있다.

즉 NOx와 SOx는 완전히 제거 또는 상당한 수준까지 낮출 수 있는 기술을 보유하고 있는 반면, 온실 가스인 이산화탄소의 제거는 현실적으로 실용화할 수 있는 기술을 보유하고 있지 못하다. 입자성 방출물은 집진기를 통해서 제거가 가능하다.

향후 기술적으로 개선된 석탄 화력 발전소는 유동층 연소 방법을 사용하고, 석탄 기체화 방법을 통해서 SOx와 NOx를 충분히 낮은 수준으로 유지할 수 있을 것이다.

이산화탄소 문제는 더욱 복잡하다. 산업 혁명 이후, 280ppmv에서 90년의 350ppmv까지 증가하였다. IPCC (Inter-governmental panel an Climate Change)는 95년에 발간한 보고서에서 위에서 언급한 기간 동안 평균 지구 표면 온도가 0.3~0.6 °C 상승하였다고 발표하였다.

IPCC의 분석으로부터 도출된 일반적인 결론은 기후 변화가 지구 환경에 심각한 위협이 되고 있으며, 온실 가스를 절감시키기 위한 노력을 기울이지 않으면 안된다는 것이다.

또한 기후 변화에 적응할 수 있는 준비를 갖추어야 하며, 이미 기후 변화에 가속도가 붙고 있기 때문에 중대한 환경적 변화가 초래될 가능성을 명심해야 한다는 것을 강조하고 있다.

발전용 연료를 가스로 전환할 경우

이산화탄소 방출량을 감소시키는 데 직접적인 이득이 있는 것은 분명하다. 또한 가스 매장량이 충분한 기간 동안은 경제적 · 환경적으로 우수한 연료원이 될 수 있다. 그러나 가스는 장기적으로 볼 때 매장량이 충분하지 못하다.

석탄 매장량이 충분한 국가인 인도 및 중국은 여전히 석탄을 주요 전력 생산 수단으로 활용할 것이다.

따라서 <그림 4>에서 보는 바와 같이 현재까지 가용한 방법을 이용하여 열효율을 개선한다면, 석탄 연소로 인한 이산화탄소 방출량을 크게 줄이는 데서 얻는 이익은 상당할 것이다.

만약 최신의 청정 석탄 연소 기술을 활용하여 열효율을 60%까지 향상시킬 수 있다면 석탄 연소로 인한 이산화탄소 방출량은 현저하게 줄어들 것으로 기대되고 있다. 그리고 충분히 실현 가능하다. 현재 열효율 60~70%를 목표로 고온 석탄 기화를 이용한 고온 CCGT 설계에 관한 연구가 진행중이다.

원자력의 역할

오늘날 전세계적으로 약 435기의 상업용 원자로가 운전되고 있는데, 총설비 용량은 350GWe이며, 전세계 전력 수요의 17%를 공급하고 있다.

그러나 시나리오 B에 근거한 WEC의 예측에 따르면 다음 세기 말에는 에너지 공급을 위한 연료원에

현저한 변화가 있게 된다.

그러한 변화는 앞에서 언급한 것과 같이 자원과 환경적인 제약에 크게 기인하는 것이다. <그림 5>에서 보는 바와 같이 화석 연료의 사용은 전체적으로는 감소하게 되며, 전체의 약 30%를 점유함으로써 그 역할이 증대되고, 원자력 및 재생 에너지의 역할 또한 상당히 증대된다.

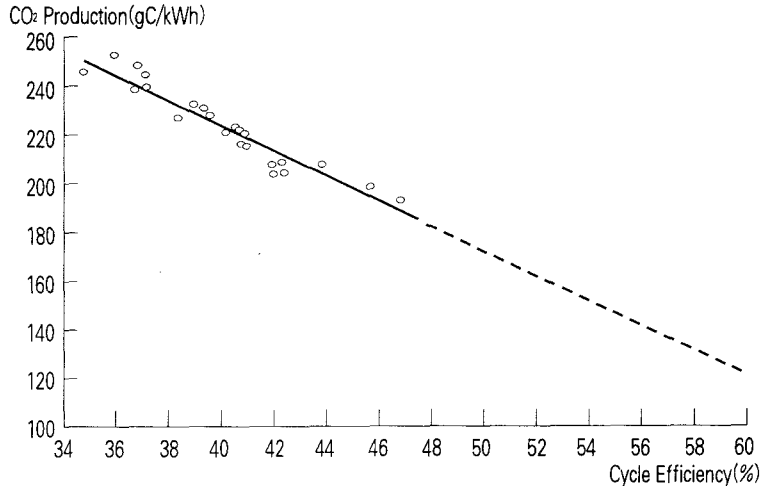
앞에서 언급한 전력 수요 증가를 기준으로 우리는 향후 원자력의 설비용량 증가를 추산해 볼 수 있다(그림 6). 그 수치는 현재 전세계 전력 생산량 중 원자력이 차지하는 비율을 반영한 것이다.

이용률 70%로 운전되는 1,000 MWe급 원전을 기준으로 할 때 2020년경에는 약 560기가 운전될 것이며, 2100년경에는 7,000기가 운전되게 된다.

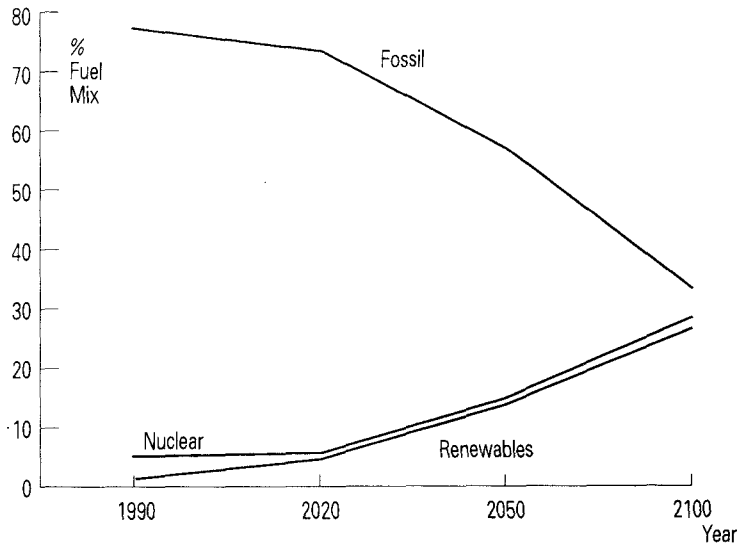
원자력이 차지하는 비율을 약 15% 정도로 낮게 잡더라도 설비용량은 2100년경에는 1,500GWe로 증가하게 될 것이다.

앞에서 언급한 주요 촉발 인자를 고려하고, WEC와 다른 전문 기구의 에너지 수요 예측을 고려할 때 21세기에는 원자력의 역할이 더욱 커질 것이라는 것은 의심의 여지가 없다.

원자력의 가장 큰 장점은 SOx, NOx 및 온실 가스를 방출하지 않는다는 데 있다. 이 점은 OECD의 Planning Director인 Skinner의 보고서에서 분명히 나타나고 있다.



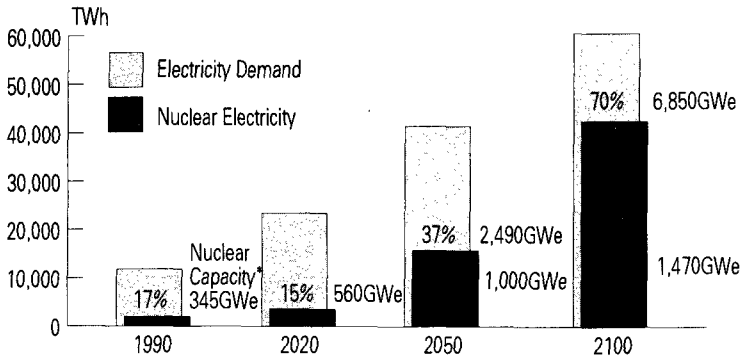
(그림 4) 이산화탄소 방출량과 연소 탄소 효율



(그림 5) 연료 공급 변화 예측

그는 “지난 50년간 OECD 국가들의 이산화탄소 방출량이 줄어들었던 해는 75~85년 사이인데, 이 시기에 원자력 발전 점유율이 20% 이상으로 증가했다” 라고 지적하였다.

따라서 현재 세계의 많은 국가들이 원자력 발전을 실질적으로 동결시키고 있으며, 신규 원전의 발주가 급격히 줄어들고 있다는 것은 중요한 문제이다.



* 설비 용량 : 90년도에는 부하율 65%로 운전, 그 이후는 70%로 운전하는 것을 가정

(그림 6) 2100년 까지의 원자력에 의한 전력수요

이러한 추세가 지속된다면 향후 20~30년 이내에 세계의 많은 국가들에서 원자력 발전의 중지가 예상되며, 이 경우 전세계 에너지 수급 상황에 중대한 영향을 미치게 될 것이다.

이러한 원자력 발전의 정체 현상의 배경에는 원자력에 대한 일반 공중의 신뢰도 상실이 있는데, 특히 방사성 폐기물, 안전 및 플루토늄 관리 등에 대해서 의혹의 시선을 보내고 있다.

1. 방사성 폐기물

원자력 발전 기술 개발 초창기에 방사성 폐기물 및 폐로 등 원자력 발전으로 인한 부수적 문제에 대해 관심이 소홀하였다는 것은 공인된 사실이다. 따라서 방사성 폐기물의 전체적인 관리, 즉 취급·가공·저장 및 처분 등에 관한 확고한 전략이 신속히 수립되지 않으면 안된다.

영국에서는 76년의 환경 오염 사고 이후 방사성 폐기물의 안전한 처

리·적납 저장 및 처분 등에 관한 기술적 근거를 확립하는 등 현저한 발전을 이룩하였다.

그럼에도 불구하고 미국 등지의 군사용 원자력 시설 등에서 방사성 폐기물의 유출 사고를 야기한 폐기물 관리 미흡 사례가 보고되고 있다. 따라서 이러한 문제를 해결해 낼 수 있는 기술적·경제적 대책이 필요하다.

반면 민간용 원자력 시설의 폐기물 관리 상황은 상당히 양호하다고 할 수 있다.

모든 종류의 방사성 폐기물의 안전한 처리·저장 및 처분을 위한 방법을 개발하고 입증하기 위한 진전이 이루어지고 있다. 또한 광범위한 국제 협력도 이루어지고 있다.

그럼에도 불구하고 일반 공중의 신뢰 저하는 원자력 발전 사업의 진흥을 가로막는 주요 장애가 되고 있다. 특히 폐기물 처분 문제에 대해서 강력한 반대가 집중되고 있다.

그리고 많은 국가들이 영구 처분장, 심지어는 시험적인 심층 처분장의 부지마저도 확보하는 데 적지 않은 어려움을 겪고 있다.

이런 측면에서 한국의 굴업도 처분장 부지의 포기 결정은, 물론 기술적인 요인에 의한 것이기는 하지만 심각한 퇴보로 간주될 수 있다.

2. 원자력 안전

원자력 산업계의 안전 기준은 매우 높으며, 안전 요건을 평가하기 위한 방법론은 여타 산업계, 즉 석유 화학 산업 등에서도 채택하여 활용하고 있다.

그럼에도 불구하고 원자력 발전소에서는 체르노빌 및 TMI 원전 사고와 같은 대형 사고를 비롯하여 잡다한 사고가 지속적으로 발생하고 있다.

이러한 사고들은 원자력 안전에 대한 일반 공중의 신뢰를 약화시키며, 방사선에 대한 두려움을 폭증시킨다.

원자력 발전이 향후 급증하는 전력 수요를 충족시키는 데 기여할 수 있기 위해서는 공중의 신뢰를 회복하는 것이 전제 조건이다.

원자력 안전에 관련된 두 가지의 현안 사항은, 옛 소련형 원전의 안전한 운영과 보다 단순하고 고유 안전 특성을 갖는 원전을 설계하는 것이다.

그 중에서도 옛 소련형 원전의 안전한 운영은 더 시급한 과제이다.

체르노빌 사고 이후 세계원전사업 자협회 및 전문 기관들이 이러한 문

제를 해결하는 데 참여하고 있다.

현재까지 많은 안전성 평가가 수행되고 있고 옛 소련형 원전의 안전성에 관한 보고서가 발표되고 있지만, 실질적인 조치는 그다지 많이 이루어지고 있지 않다.

이런 의미에서 옛 소련형 원자로 운영자그룹의 로드 마샬 위원장의 언급 - 보고서가 안전성을 증진시켜주는 것은 아니다 - 은 매우 적절하다고 생각된다.

현재 가장 시급히 요구되고 있는 것은 다음과 같다.

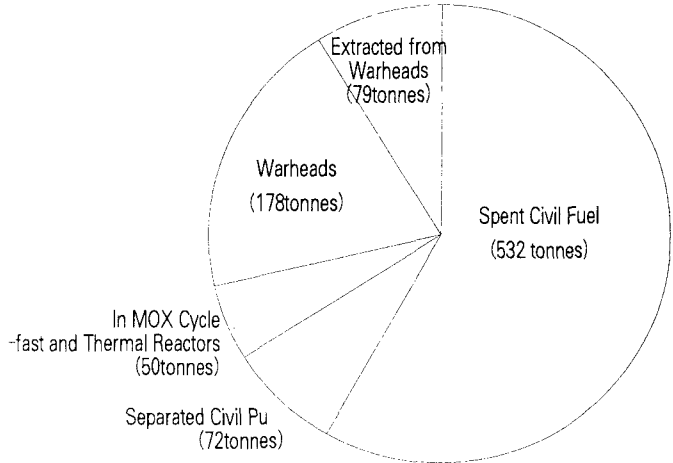
① 발전소 소유자, 운영자 및 공급자간의 긴밀한 협력 관계의 유지, 소유자와 지역 산업계가 기반 시설을 확충할 수 있도록 기술적인 지원 제공

② 현재 운영중인 체르노빌 원전의 폐쇄와 사고가 난 원전의 차폐체를 보강하기 위한 정부의 의지와 재정적 지원

두번째 과제는 원전의 안전 설비를 어떻게 하면 보다 더 단순하게, 보다 더 경제적으로 보강하여 안전 수준을 최대한으로 높일 수 있는가하는 것이다. 현재 단순성과 경제성은 전세계 원자력계의 화두가 되고 있다.

예를 들어, 미국전력연구소는 새로운 기준으로 광범위하게 수용되고 있는 개량형 원전에 대한 지침을 개발하였다.

기존의 설계에 기초를 둔 ABB사의 System 80⁺, GE사의 ABWR, AECL사의 CANDU 및 웨스팅하우스



(그림 7) 1990년까지 축적된 플루토늄의 양(톤)

스사의 AP600 및 프랑스와 독일의 합작 설계인 유럽형 가압 경수로 원전 등이 미국전력연구소의 설계 지침을 따르고 있다. 한국도 이러한 활동에 매우 능동적으로 참여하고 있다.

그러나 일반적으로 말할 때, 현재의 원자력계는 새로운 원전 설계의 도입을 적극적으로 시도하지 않고 있는 것으로 보여진다.

개량형 설계중에서 ABWR만이 수주가 이루어졌으며, 여기에는 일본의 도시바, 히다치 및 GE사 등이 협력 관계를 유지하고 있다.

3. 연료 주기 및 플루토늄 관리

열중성자로에서 우라늄 238이 변환하면, 핵분열 물질인 플루토늄 239와 241이 생성된다.

예를 들어 산화 우라늄을 원료로 사용하는 일반적인 가압 경수로로 1

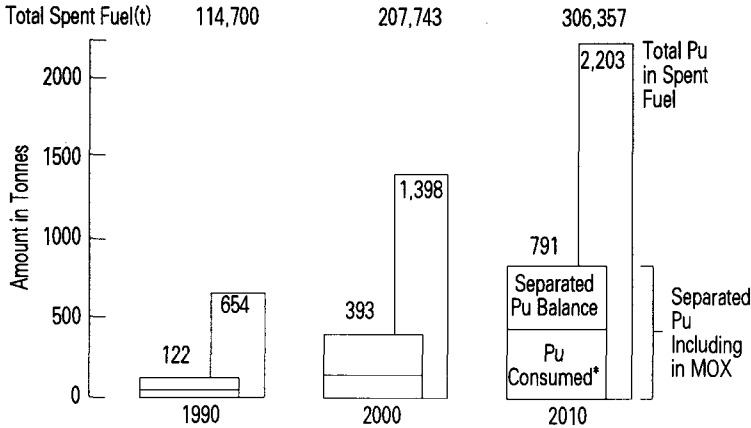
년 동안 가동하면 약 200Kg의 플루토늄이 생성된다.

신형 가스 냉각로의 경우에는 가압 경수로에서 생성되는 플루토늄 양의 50%, CANDU 및 MAGNOX 원자로의 경우에는 약 40%가 생성된다.

핵분열성 플루토늄은 플루토늄 전체 생산량의 약 60%에 해당하는데, 열중성자로 또는 고속 증식로에서 재활용된다면 매우 소중한 자원이 될 수 있다.

또한 군사적인 목적으로도 활용될 수 있기 때문에 IAEA에 의해서 국제적으로 통제되고 있다. 플루토늄의 관리의 원자력계가 안고 있는 가장 어려운 현안 문제 중의 하나이다.

그 이유는, 정치적인 복잡성은 차치하고라도 미국 및 러시아의 핵무기 해체 프로그램의 결과로 발생된 플루토늄을 어떻게 안전하게 관리할 수



*참조 연소 가정, MOX연료 1/3장전, 재처리 공장 최대 가동, MOX 연료 최대 가동 가정

(그림 8) 민간용 원자로에서의 플루토늄 처분

있으나하는 데 있다.

(그림 7)에는 여러가지의 형태로 축적된 플루토늄의 양에 대한 평가치가 나타나 있다. 90년까지 추출된 플루토늄의 총량은 약 200톤 정도이다.

(그림 8)은 이 분석을 2010년까지 연장한 것인데 민간용 원자로로부터 추출되는 플루토늄의 양은 약 800톤 정도가 될 것이다.

플루토늄의 관리에 관하여 두 가지의 입장이 대립되고 있다.

미국의 경우 상업용 원자로의 사용 후 연료로부터 플루토늄의 추출을 반대하고 있다.

즉 플루토늄을 방사성 폐기물로 간주하여 처분하자는 것이다.

핵무기로부터 추출된 플루토늄의 처리에 관해서는 두 가지 방안을 고려하고 있는데, 폐기물로 분류하여 처리하자는 방안과 MOX연료로 변환

시켜 활용하자는 방안이 그것이다.

미국과 반대의 입장을 취하고 있는 러시아·프랑스·일본 등은 플루토늄 재처리, MOX연료로의 변환, 열중성자로 및 고속 증식로에서의 재활용 방안을 지지하고 있다.

독일·스위스·벨기에 등은 중간적인 입장을 취하고 있는데, 재처리된 플루토늄을 열중성자로에서 재활용하자는 것이다.

또 한가지의 중요한 대안은 한국 및 캐나다에서 제기되고 있는데, 가압 경수로 원전에서 발생한 사용후 핵연료를 CANDU에 활용하자는 것이다(DUPIC Cycle).

CANDU에서는 감속재로 중수를 사용하고 있기 때문에 플루토늄과 소량의 악티늄 원소는 경수로의 경우보다 훨씬 낮은 수준으로 감소된다.

이러한 기술을 개발하는 데는 해결

해야 할 많은 문제가 있지만, 경수로에서 플루토늄을 재활용하는 것에 비해 훨씬 효과적인 방안으로 고려되고 있다.

결론

결론적으로 말하면, 21세기의 에너지 수요를 충족시키기 위해서는 원자력의 역할이 반드시 요구된다.

신뢰할 수 있는 예측에 따르면 원자력은 화석 연료, 특히 석탄 및 재생 에너지와 함께 이용이 확산될 것이다.

원자력 발전량의 비율은 화석 연료의 사용으로 인한 환경적인 영향의 정도, 새로운 재생 에너지원의 등장, 에너지 수요의 증가 정도에 따라 결정될 것이다.

그러나 원자력이 주어진 역할을 충분히 수행할 수 있기 위해서는 반드시 극복해야 할 장애물이 있다.

특히 모든 종류의 방사성 폐기물을 완벽하게 처리하는 방안을 확보하는 것이 중요하다.

또한 원자력 안전에 대한 일반 대중의 신뢰를 수용할 수 있는 비용으로 확보해야 한다.

또한 플루토늄 관리 문제가 해결되어야 한다.

이러한 모든 문제는 국제 협약 등을 통한 범지구적 차원에서의 협력 관계를 통해서 해결될 수 있다.